

# PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN AL AIRE.

## Efecto de la edad del hormigón en la permeabilidad

(THE PERMEABILITY OF CONCRETE TO AIR.  
The effect of ageing of concrete on its permeability)

Rafael Muñoz Martialay, Dr. en Ciencias Físicas  
IETcc/CSIC-España

Fecha de recepción: 8-XI-88

680-5

### RESUMEN

*Se describen los resultados obtenidos sobre la evolución de la permeabilidad al aire de seis placas de hormigón durante un período de 23 años.*

*Las medidas se han realizado a cuatro escalones de presión: 0,40; 0,95; 1,35 y 1,90 kp/cm<sup>2</sup> y las placas de hormigón, de dimensiones 1 x 1 x 0,20 m; se han mantenido en una nave de ensayos.*

*Los resultados de la permeabilidad que se presentan tienen un valor cualitativo, pues se desconoce el efecto de borde. En la bibliografía que se cita, la publicación (1) incluye resultados cuantitativos de ocho hormigones de distinta dosificación.*

*Es de destacar las diferencias obtenidas entre las placas, aún teniendo la misma dosificación y estar igualmente conservadas.*

*Después de 23 años de fabricado el hormigón y en las condiciones de conservación normales de una nave de ensayos, se observa que el valor de la permeabilidad tiende a estabilizarse, especialmente a la presión más baja, 0,40 kp/cm<sup>2</sup>*

### SUMMARY

*The results obtained describe the change in permeability to air of six slabs of concrete during a period of 23 years.*

*The measurements were taken at four intervals of pressure: 0.40, 0.95, 1.35 and 1.90 kp/cm<sup>2</sup>, and the concrete slabs, measuring 1 x 1 x 0.20 m, were kept in a test shed.*

*The results in the permeability which are put forward have a qualitative value, therefore the effect to the edges has been discounted. In the bibliography quoted, the publication (1) includes quantitative results of eight differently composed concretes.*

*This is to emphasize the differences obtained in the slabs despite having the same preparation and having been conserved in the same way.*

*After 23 years of producing concrete, and under normal conditions of conservation in the test shed, it is noted that the point of permeability tends to stabilize specially at the lowest pressure of 0.40 kp/cm<sup>2</sup>*

### Introducción

Uno de los problemas que presentan las construcciones de hormigón destinadas al almacenamiento de gases, cámaras de vacío, edificios nucleares, conductos para el transporte de fluidos, etc., es el de que, al no ser el hormigón un material estable, aumenta su permeabilidad con el paso del tiempo.

Este aumento de la permeabilidad implica una disminución continua de la eficacia del cerramiento, llegando a inutilizar la construcción cuando las pérdidas alcanzan niveles que resultan peligrosos o no rentables económicamente; como, por ejemplo, se presentan en los casos de depósitos de gases tóxicos, de elemen-

tos radiactivos o en cámaras de vacío para la potabilización del agua de mar.

Por otra parte, si se tiene en cuenta que los gases que atraviesan el hormigón favorecen la carbonatación de la cal y la corrosión de las armaduras, es obvia la importancia que tiene conocer la permeabilidad del hormigón, ya que cada vez se emplean secciones más esbeltas y con armaduras tesas que permiten recubrimientos con muy poco espesor, lo que facilita dicha corrosión.

Toda esta problemática es la razón por la que el Instituto Eduardo Torroja iniciara en el año 1965 el estudio sobre la permeabilidad al aire del hormigón, distinguiendo los tres aspectos siguientes:

- a) *La determinación de las características* del hormigón: clase de áridos, granulometría, dosificación, relación agua/cemento, y método de fabricación con el fin de obtener un hormigón lo más impermeable posible a los gases.
- b) *El trabajo experimental* para conocer cualitativa y cuantitativamente los valores de la permeabilidad.
- c) *El efecto de la edad* del hormigón en la permeabilidad.

Los resultados de las partes a) y b) han sido publicados por el Instituto Eduardo Torroja (1) y algunos de ellos fueron presentados en el Simposio RILEM-IUPAC "Pore Structure and Properties of Materials", celebrado en Praga en 1973 (2). También el Gabinete de Aplicaciones Nucleares a las Obras Públicas recogió parte de estos resultados (3).

### Planteamiento del problema de la edad del hormigón

Partiendo de la definición de permeabilidad, como la propiedad de los materiales por la cual un fluido puede atravesarlo, al penetrar por sus poros, cuando existe una diferencia de presión entre las superficies de entrada y salida del fluido en dicho material, se deduce que el valor de la permeabilidad será función de las características físico-químicas del medio poroso y de las propiedades del fluido.

**Características del hormigón:** Las cualidades que más directamente condicionan la porosidad del hormigón y, por consiguiente, su permeabilidad son: la compactación, la constancia de volumen y la cohesión.

Estas tres cualidades dependen, fundamentalmente, de los materiales, de la proporción en que intervengan, y de la preparación y fabricación del hormigón. De cada una de estas variables se hace un análisis detallado en la publicación del Instituto Eduardo Torroja (1).

En un hormigón bien compactado la porosidad representa el 12 por 100, aproximadamente, de su volumen aparente (4).

Por otra parte, la fabricación del hormigón precisa la aportación de una cantidad de agua muy superior a la que necesita el cemento para hidratarse y que es del orden del 20 por 100 de su peso en agua (5), lo que supone un 50 por 100 del total de agua empleada en la fabricación de hormigones normales, más bien secos.

El agua empleada en la fabricación del hormigón, y que no es absorbida por el cemento, se va evaporando en un proceso continuo que puede durar varios años, en función del grado de humedad y temperatura del am-

biente en que se encuentre el hormigón, lo que supone que su porosidad aumente y, por lo tanto, también su permeabilidad.

Por ello, esta parte del estudio se orientó a la toma de datos sobre la variación de la permeabilidad al aire del hormigón al paso del tiempo.

### Características de las probetas de ensayo

El estudio general de la permeabilidad al aire del hormigón se ha realizado sobre probetas cilíndricas de 130 milímetros de diámetro y 70 mm de altura y sobre placas cuadradas de 1.000 × 1.000 mm tres espesores.

Las probetas cilíndricas se fabricaron en ocho dosificaciones distintas y nueve probetas de cada dosificación (72 probetas en total). El detalle y resultados figuran en una Monografía publicada por el Instituto (1).

Las placas cuadradas, fabricadas a un mayor tamaño, tenían como objetivo la aplicación real del problema, y se prepararon placas con dos dosificaciones, así como en hormigón en masa y en hormigón armado, y en tres espesores: 20, 30 y 40 cm para las de hormigón en masa, y un solo espesor (20 cm) para las armadas. De cada tipo se fabricaron 6 placas iguales, con un total de 48 placas. La descripción detallada de las placas y los resultados obtenidos de la permeabilidad fueron publicados por el Gabinete de Aplicaciones Nucleares a las Obras Públicas (5). La figura 1 muestra el conjunto de las placas fabricadas con un tratamiento de pintura para reducir el efecto de borde, dejando sin pintar las superficies de paso del aire (un circuito de 650 milímetros de diámetro en las dos caras).

Para el estudio del efecto de la edad del hormigón en su permeabilidad al aire se destinaron seis placas iguales de 20 cm de espesor con la siguiente dosificación:

| COMPOSICION   | CANTIDAD kg/m³ |
|---------------|----------------|
| Gravilla      | 387            |
| Garbancillo   | 871            |
| Arena         | 651            |
| Cemento P-350 | 405            |
| Agua *        | 150 litros     |
| Agua/cemento  | 0,37           |
| Compactación: | Vibrado*       |

\*Con aguja a 9.000 v.p.m.

La resistencia de este hormigón a los 28 días era de 403 kp/cm², en probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro. <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>

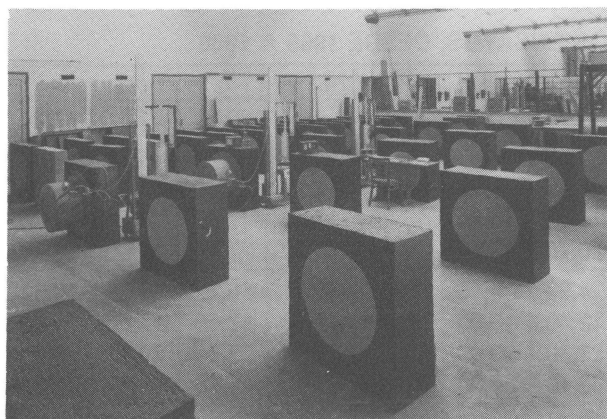


Fig. 1.—Vista general de las placas de ensayo.

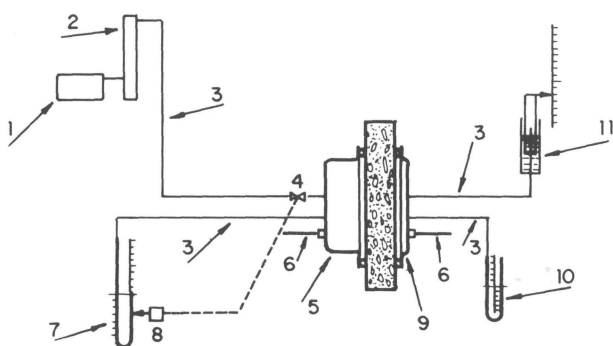
### Trabajo experimental

El trabajo experimental ha consistido en medir la permeabilidad al aire de las seis placas de hormigón, a los 3,5 meses de su fabricación; a los 16,5 meses; a los 24 y ya, sucesivamente, cada año hasta 1988.

Durante todo este tiempo las placas se han mantenido en una nave de ensayos de dimensiones:  $33 \times 13 \times 7$  m, y cuyas condiciones higrotérmicas varían entre los 15 y 25 °C y entre el 40 y 70 por 100 de humedad relativa, al cabo de un año.

La técnica seguida para el ensayo ha consistido en mantener una presión constante en una de las caras de la placa y recoger, en la opuesta, el aire que la atravesaba durante un determinado tiempo. En la figura 2 se presenta un esquema del dispositivo de ensayo y la figura 3 muestra un detalle del ensayo de una placa.

La descripción del equipo de presión, recipientes para el aire, aparatos de control, regulación y medida; así como la técnica de los ensayos: puesta a punto, tiempo de duración, etc. se recogen con detalle en las publicaciones que se citan en la bibliografía, a la que se ha hecho referencia.



1. Compresor de aire. 2. Depósito de aire comprimido. 3. Tubo de plástico. 4. Válvula automática accionada por (8). 5. Depósito de presión. 6. Termómetros. 7. Manómetro en U de Hg. 8. Regulador electrónico con dos células fotoeléctricas para mantener la presión en (5). 9. Depósito de recepción de aire. 10. Manómetro en U de agua. 11. Gasómetro para la medida de los gases.

Fig. 2.—Esquema del dispositivo de ensayos.

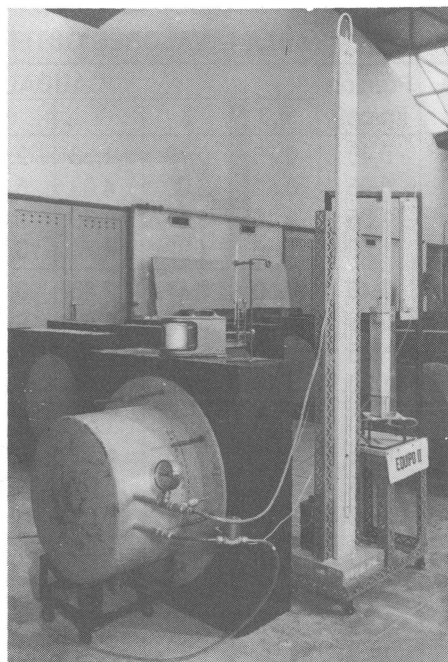


Fig. 3.—Detalle del dispositivo de ensayo.

po de duración, etc. se recogen con detalle en las publicaciones que se citan en la bibliografía, a la que se ha hecho referencia.

Los ensayos se han realizado a cuatro escalones de presión: 0,400; 0,950; 1,350 y 1,900  $\text{kp/cm}^2$ , y los resultados se expresan en  $\text{dm}^3/\text{m}^2\text{h}$  a 20 °C y 760 mm Hg de presión atmosférica.

Es decir, indican el volumen de aire que, durante una hora, pasa a través de una placa de hormigón de 1  $\text{m}^2$  de superficie y 20 cm de espesor, para cada presión.

### Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla I de la página siguiente. Si bien los ensayos se han realizado cada año, con el fin de simplificar la presente exposición, en la tabla se incluyen sólo los valores de cada dos años.

Del total de los resultados de los ensayos se han deducido, para cada placa y presión, las ecuaciones de segundo grado por el método de los mínimos cuadrados y que, gráficamente, se representan en las figuras 4 a 9.

### Análisis de los resultados

A la vista de los resultados se observa que existe una fuerte dispersión entre las placas: la placa más permeable (n.º 2) da valores del orden de 4 veces los de la placa menos impermeable (n.º 5).

TABLA I. VALORES OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS, DESDE 1965 A 1988

| Placa N.º | Presión<br>kp/cm <sup>2</sup> | CAUDAL DE AIRE EN dm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h a 20 °C y 760 mm Hg |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------------------------------|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           |                               | 0,3   | 2    | 4     | 6     | 8     | 10    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    |
| 1         | 0,40                          | 0,25  | 0,79 | 1,53  | 2,19  | 2,76  | 3,23  | 3,61  | 3,90  | 4,09  | 4,20  | 4,21  | 4,21  |
|           | 0,95                          | 0,59  | 2,00 | 4,03  | 5,82  | 7,36  | 8,66  | 9,72  | 10,50 | 11,10 | 11,40 | 11,50 | 11,51 |
|           | 1,35                          | 1,10  | 3,27 | 6,39  | 9,13  | 11,50 | 13,50 | 15,10 | 16,30 | 17,10 | 17,60 | 17,70 | 17,85 |
|           | 1,90                          | 1,60  | 4,92 | 9,71  | 13,90 | 17,60 | 20,70 | 23,20 | 25,10 | 26,50 | 27,30 | 27,60 | 27,75 |
| 2         | 0,40                          | 0,50  | 1,41 | 2,48  | 3,42  | 4,24  | 4,93  | 5,49  | 5,93  | 6,24  | 6,42  | 6,48  | 6,52  |
|           | 0,95                          | 1,20  | 3,62 | 6,62  | 9,25  | 11,50 | 13,40 | 15,00 | 16,20 | 17,00 | 17,50 | 17,60 | 17,68 |
|           | 1,35                          | 1,90  | 6,28 | 10,90 | 15,00 | 18,40 | 21,30 | 23,60 | 25,40 | 26,50 | 27,10 | 27,10 | 27,15 |
|           | 1,90                          | 3,10  | 9,40 | 16,40 | 22,60 | 27,90 | 32,40 | 36,00 | 38,80 | 40,70 | 41,70 | 41,90 | 42,00 |
| 3         | 0,40                          | 0,30  | 0,77 | 1,52  | 2,20  | 2,81  | 3,34  | 3,79  | 4,18  | 4,49  | 4,72  | 4,89  | 5,91  |
|           | 0,95                          | 0,71  | 2,18 | 4,32  | 6,21  | 7,85  | 9,25  | 10,40 | 11,30 | 11,90 | 12,30 | 12,50 | 12,53 |
|           | 1,35                          | 1,25  | 3,70 | 6,90  | 9,75  | 12,00 | 14,40 | 16,10 | 17,60 | 18,60 | 19,40 | 19,70 | 20,05 |
|           | 1,90                          | 2,10  | 5,64 | 10,63 | 15,10 | 18,90 | 22,30 | 25,00 | 27,20 | 28,80 | 29,90 | 30,50 | 31,10 |
| 4         | 0,40                          | 0,12  | 0,32 | 0,68  | 1,01  | 1,32  | 1,59  | 1,83  | 2,05  | 2,23  | 2,39  | 2,51  | 2,70  |
|           | 0,95                          | 0,41  | 0,76 | 1,69  | 2,56  | 3,38  | 4,14  | 4,85  | 5,50  | 6,09  | 6,63  | 7,11  | 7,51  |
|           | 1,35                          | 0,65  | 1,30 | 2,72  | 4,05  | 5,29  | 6,44  | 6,50  | 8,48  | 9,37  | 10,20 | 10,90 | 11,55 |
|           | 1,90                          | 1,00  | 1,93 | 4,11  | 6,14  | 8,03  | 9,78  | 11,40 | 12,80 | 14,10 | 15,30 | 16,30 | 17,30 |
| 5         | 0,40                          | 0,06  | 0,21 | 0,57  | 0,88  | 1,15  | 1,36  | 1,53  | 1,65  | 1,72  | 1,75  | 1,72  | 1,74  |
|           | 0,95                          | 0,22  | 0,61 | 1,39  | 2,13  | 2,81  | 3,44  | 4,03  | 4,56  | 5,05  | 5,48  | 5,87  | 5,99  |
|           | 1,35                          | 0,32  | 1,01 | 2,22  | 3,34  | 4,37  | 5,32  | 6,18  | 6,95  | 7,64  | 8,24  | 8,75  | 8,91  |
|           | 1,90                          | 0,55  | 1,55 | 3,38  | 5,09  | 6,65  | 8,08  | 9,38  | 10,50 | 11,60 | 12,50 | 13,20 | 13,60 |
| 6         | 0,40                          | 0,16  | 0,33 | 0,62  | 0,89  | 1,15  | 1,39  | 1,61  | 1,83  | 2,02  | 2,21  | 2,38  | 2,50  |
|           | 0,95                          | 0,27  | 0,77 | 1,47  | 2,16  | 2,83  | 3,50  | 4,15  | 4,79  | 5,41  | 6,03  | 6,63  | 7,20  |
|           | 1,35                          | 0,61  | 1,27 | 2,29  | 3,30  | 4,31  | 5,32  | 6,33  | 7,33  | 8,32  | 9,31  | 10,30 | 11,22 |
|           | 1,90                          | 0,96  | 1,97 | 3,49  | 5,00  | 6,52  | 8,03  | 9,54  | 11,00 | 12,60 | 14,10 | 15,50 | 16,83 |

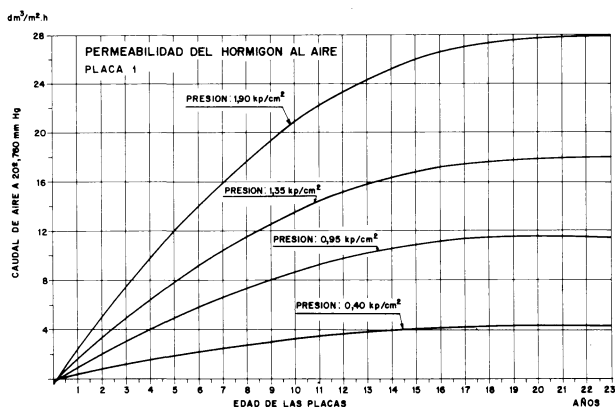


Fig. 4.

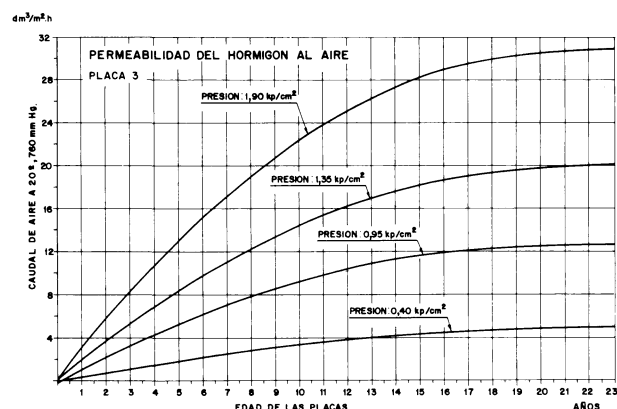


Fig. 6.

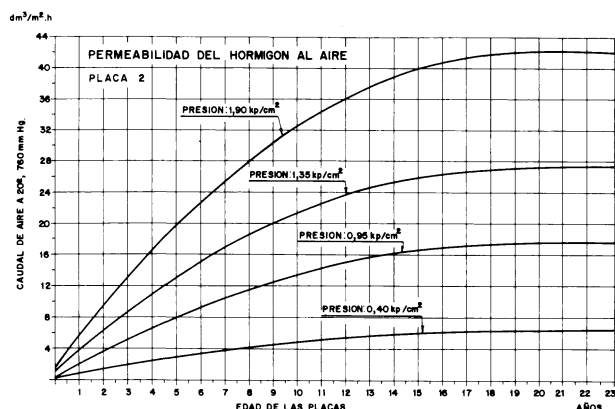


Fig. 5.

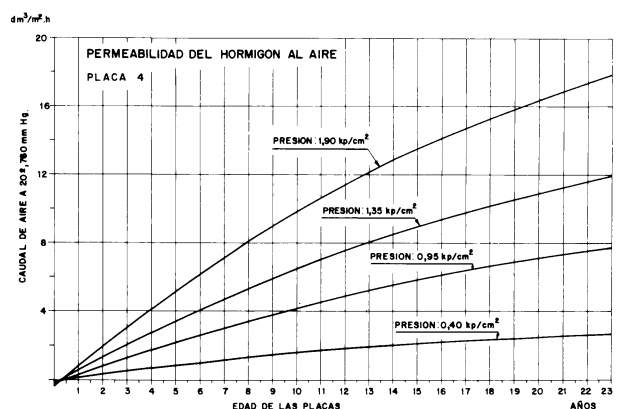


Fig. 7.

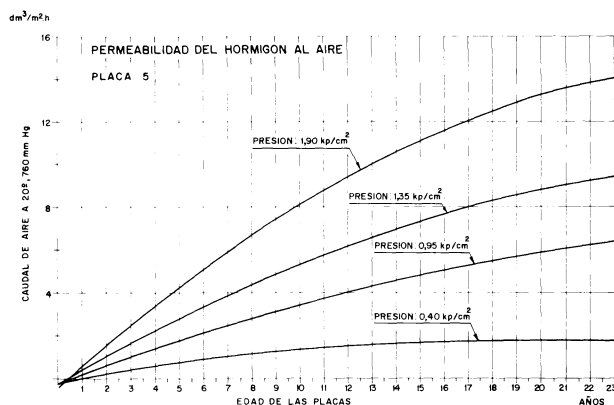


Fig. 8.

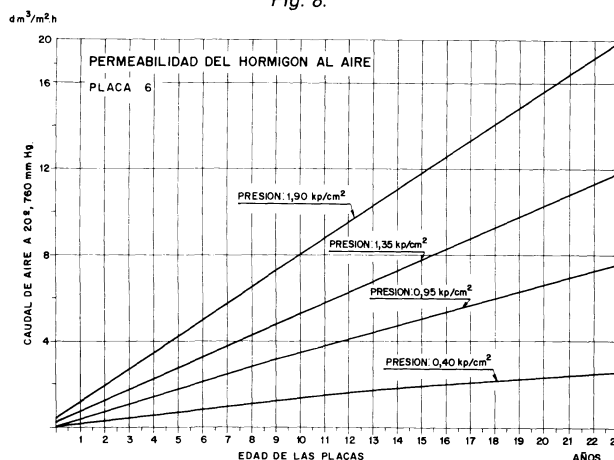


Fig. 9.

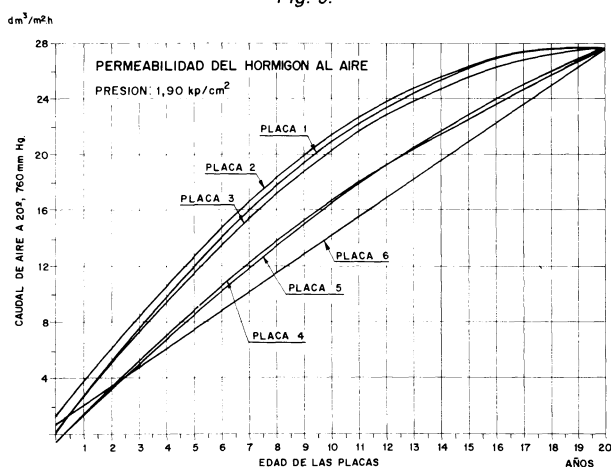


Fig. 10.

Por otra parte, sólo las placas números 1 y 2 parece que se ha estabilizado y las números 5 y 6 presentan todavía una fuerte pendiente.

Sin embargo para cada placa, analizada independientemente, los valores obtenidos cada año son lógicos y el aumento de la permeabilidad en una placa se refleja en el mismo sentido en las otras. Como ejemplo de lo indicado en la figura 10 se han representado las curvas a la presión 1,90 kp/cm<sup>2</sup>, haciendo coincidir los puntos extremos (a los 20 años) y aplicando a la escala de las ordenadoras la afinidad correspondiente.

Se observa claramente que tres placas coinciden sensiblemente. También coinciden entre sí dos placas y sólo una placa, la número 6, presenta un tipo de trayectoria distinta a las otras cinco.

Esta concordancia en las curvas es más notable para los escalones inferiores de presión, pues se ha tomado como ejemplo la más desfavorable; fácilmente se comprueba que para la presión más baja —0,40 kp/cm<sup>2</sup>— las seis curvas quedarían, prácticamente, superpuestas.

## Conclusiones

Como ya se ha indicado, la presente exposición es una parte del trabajo que se está realizando, por lo que la justificación de algunas conclusiones se deducen de los resultados recogidos en las publicaciones (1) y (2):

- 1.<sup>a</sup> Los valores de la permeabilidad que figuran en la TABLA I son cualitativos, pues se desconoce el efecto de borde.
- 2.<sup>a</sup> La diferencia de los resultados de las seis placas refleja la heterogeneidad de la microestructura de los hormigones, aunque tengan la misma dosificación.
- 3.<sup>a</sup> La permeabilidad del hormigón en las condiciones de conservación señaladas, y con un espesor de 20 cm, sigue aumentando al cabo de los 23 años, aunque se observa ya la tendencia a estabilizarse.
- 4.<sup>a</sup> Un aumento proporcional en una placa se refleja en el mismo sentido en las otras placas.
- 5.<sup>a</sup> En el hormigón se cumple la analogía existente entre los fenómenos de difusión, transmisión de calor, transporte de fluidos, etcétera.

## Bibliografía

1. R. Muñoz Martialay.—“Permeabilidad al aire del hormigón”. Monografía n.º 332 del Instituto Eduardo Torroja (diciembre 1975).
2. R. Muñoz Martialay.—“La perméabilité à l'air du béton”. Colloquio Internacional RILEM-UPAC; Praga, Rapport final, parte IV (septiembre 1973).
3. Gabinete de Aplicaciones Nucleares a las Obras Públicas.—“Permeabilidad al aire de hormigones”. Publicación EN-3 (1967).
4. Duhoux, L.—“La compacité des bétons Méthodes de mesure”. Publication Technique du CERILH, 28/30 (1963).
5. Power, Research Laboratories of the Portland Cements Association. Bull N.º 29 (1949).